

◇ 研究报告 ◇

固-固界面退化特性的超声反射评价方法*

徐帆 吴坤 许才彬 邓明晰†

(重庆大学航空航天学院 重庆 400044)

摘要: 提出了一种基于有限宽超声束反射的固-固界面退化特性评价方法,从理论和数值仿真角度进行了分析和计算。将两固体界面间的薄层简化为界面弹簧模型,以界面法向和切向劲度系数表征界面的退化程度。通过数值计算求得有限宽超声纵波束在不同入射角和界面不同退化程度下的反射横波、反射纵波的镜面反射系数。进一步地,通过建立二维有限元模型,仿真研究了有限宽超声纵波束在给定入射角及界面不同退化程度下镜面反射系数的变化规律。结果表明,反射纵波和反射横波的镜面反射系数随有限宽超声纵波束的入射角及界面劲度系数的改变而变化,且存在镜面反射系数随界面劲度系数单调且敏感变化的入射角,据此可准确评价界面的退化程度。

关键词: 有限宽超声束; 镜面反射系数; 界面退化特性

中图法分类号: O426.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)01-0123-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.016

The ultrasonic reflection evaluation method of solid-solid interfacial degradation

XU Fan WU Kun XU Caibin DENG Mingxi

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An approach based on the acoustic reflection of a bounded ultrasonic beam is proposed for the degradation evaluation of interfacial degradation of the solid-solid. Theoretical analysis and numerical simulation are implemented. By using a spring model for simulating the interface between the two solids, the interfacial degradation can be characterized by the normal stiffness coefficient and tangential interfacial stiffness coefficients. Under the conditions of different incident angles of a bounded ultrasonic longitudinal wave beam width and different degrees of interfacial degradation, the specular reflection coefficients of the reflected longitudinal waves and the transverse waves are obtained through numerical calculation. Furthermore, at a given incident angle, the variation of different degrees of the interfacial degradation on the specular reflection coefficient is also obtained by a 2D finite element model. It is shown that the specular reflection coefficients of the reflected longitudinal and transverse waves change with the incident angle of the bounded ultrasonic longitudinal wave beam and the interfacial stiffness coefficient. A specific incident angle in which the specular reflection coefficient changes sensitively and monotonously with the interfacial stiffness coefficient is found, which can be used to accurately evaluate the degree of interfacial degradation.

Keywords: Bounded ultrasonic beam; Specular reflection coefficient; Interfacial degradation characteristics

2021-11-05 收稿; 2022-01-18 定稿

*国家自然科学基金项目 (12134002)

作者简介: 徐帆 (1995-), 男, 重庆黔江人, 硕士研究生, 研究方向: 检测声学。

†通信作者 E-mail: dengmx65@yahoo.com

0 引言

层状复合材料是由两种或多种不同的材料复合而成,广泛使用于航空航天、船舶工程、建筑工程等领域中^[1-2]。界面是层状复合材料的结合部,具有与组合材料不同的性质,是传输运动和变形的中介,其性质会影响整个材料或结构的宏观力学行为。材料失稳破坏易从界面或其附近开始,因此对界面的评价尤为重要^[3]。其中超声检测是最常用的无损检测方法之一^[4-6]。声波传播遇到界面时会与之发生相互作用,出现反射和透射现象,根据该特性可以获取界面的力学特性。体波斜入射是常用的检测界面退化特性的检测方法。吴斌等^[7]从数值计算角度分析了浸水斜入射条件下刚度系数变化对3层粘接结构透射系数的影响,并实验验证了其正确性。艾春安等^[8]采用改进全局矩阵法数值计算了不同频率、不同入射角情况下超声平面纵波斜入射粘接结构时的反射系数随界面特性变化的规律。孙凯华等^[9]研究了粘连层界面强度与内聚强度变化对超声体波反射与透射特性的影响。迄今为止,在界面特性对超声斜入射的影响研究中,入射声波多是无限宽的平面波。然而无限宽的平面波入射只是理想化情形而实际并不存在,在实践中使用的都是宽度有限的声束。

本文根据界面弹簧模型,推导了平面纵波斜入射下的反射系数和透射系数方程。然后定义了对应于有限宽超声束的镜面反射系数,并对有限宽超声纵波束在不同退化程度界面条件下的镜面反射系数进行了数值计算。同时利用商业有限元软件,通过改变界面层弹性模量以表征界面劲度系数大小即界面退化特性,模拟了有限宽超声纵波束与界面的相互作用过程。最后对线接收的反射纵波和反射横波时域信号进行处理,分析其傅里叶变换后的频率振幅变化,从而实现对面退化特性的评价。

1 理论

1.1 界面弹簧模型

如图1所示,当两固体间的界面层厚度 h 远小于声波长且忽略其质量的情况下,可将界面薄层等效为界面弹簧模型,可用界面法向和切向劲度系数 K_N 、 K_T 表征界面性质^[10]。根据界面弹簧模型,界

面层上下两侧的应力连续、位移不连续,如图1所示,边界条件为^[11]

$$\begin{aligned}\sigma_{yy} &= \sigma'_{yy} = K_N(u_{y(2)} - u_{y(1)}), \\ \sigma_{yz} &= \sigma'_{yz} = K_T(u_{z(2)} - u_{z(1)}),\end{aligned}\quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned}K_N &= (\lambda_0 + 2\mu_0)/h_0, \\ K_T &= \mu_0/h_0.\end{aligned}\quad (2)$$

当 K_N 、 K_T 值无穷大时,界面状态为理想连接状态,应力和位移分量在界面处连续;当 K_N 、 K_T 值为零时,界面状态处于完全分离状态,退化为自由边界;当 K_N 、 K_T 为有限值时,两固体界面处于理想连接和完全分离之间,即弱连接状态,此时界面的力学特性处于退化阶段。

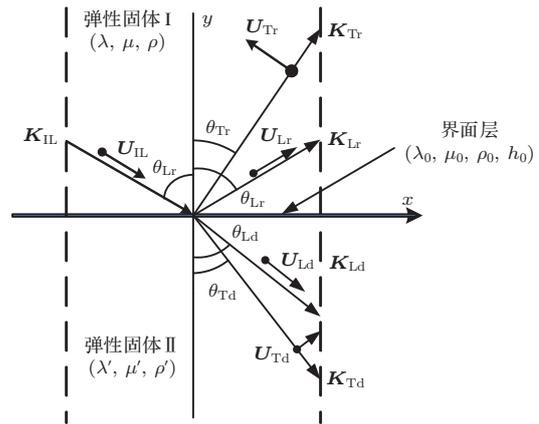


图1 声反射、透射示意图

Fig. 1 Schematic of acoustic reflection and transmission

如图1所示,当波矢为 K_{IL} 的平面纵波 U_{IL} 以入射角 θ_{Lr} 入射到两半无限大固体之间界面 $z=0$ 处时,分为两部分传播:一部分透射进入弹性固体II,而另一部分则在界面处反射回弹性固体I。同时平面纵波 U_{IL} 会在界面处发生模式转换,分别产生反射纵波 U_{Lr} 、反射横波 U_{Tr} 、透射纵波 U_{Ld} 和透射横波 U_{Td} ,其角度分别为 θ_{Lr} 、 θ_{Tr} 、 θ_{Ld} 和 θ_{Td} 。反射和透射波的反射和透射角可根据Snell定律计算得出^[12]:

$$\frac{\sin \theta_{Lr}}{c_{Lr}} = \frac{\sin \theta_{Ld}}{c_{Ld}} = \frac{\sin \theta_{Tr}}{c_{Tr}} = \frac{\sin \theta_{Td}}{c_{Td}}. \quad (3)$$

它们的位移表达式:

$$\begin{cases} U_{\text{IL}} = U_{\text{IL}} \exp[j(kz - \alpha_{\text{Lr}}ky)] \hat{\mathbf{K}}_{\text{IL}}, \\ U_{\text{Lr}} = U_{\text{Lr}} \exp[j(kz + \alpha_{\text{Lr}}ky)] \hat{\mathbf{K}}_{\text{Lr}}, \\ U_{\text{Tr}} = U_{\text{Tr}} \exp[j(kz + \alpha_{\text{Tr}}ky)] (\hat{\mathbf{K}}_{\text{Tr}} \times \hat{\mathbf{x}}), \\ U_{\text{Ld}} = U_{\text{Ld}} \exp[j(kz + \alpha_{\text{Ld}}ky)] \hat{\mathbf{K}}_{\text{Ld}}, \\ U_{\text{Td}} = U_{\text{Td}} \exp[j(kz + \alpha_{\text{Td}}ky)] (\hat{\mathbf{K}}_{\text{Td}} \times \hat{\mathbf{x}}), \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} k &= \sin \theta_{\text{Lr}} K_{\text{Lr}} = \sin \theta_{\text{Ld}} K_{\text{Ld}} \\ &= \sin \theta_{\text{Tr}} K_{\text{Tr}} = \sin \theta_{\text{Td}} K_{\text{Td}}, \\ \alpha_{\text{Lr}} &= \cos \theta_{\text{Lr}} K_{\text{Lr}}, \quad \alpha_{\text{Ld}} = \cos \theta_{\text{Ld}} K_{\text{Ld}}, \\ \alpha_{\text{Tr}} &= \cos \theta_{\text{Tr}} K_{\text{Tr}}, \quad \alpha_{\text{Td}} = \cos \theta_{\text{Td}} K_{\text{Td}}, \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)~(5)中, \mathbf{K}_{Lr} 、 \mathbf{K}_{Tr} 、 \mathbf{K}_{Ld} 和 \mathbf{K}_{Td} 分别为反射横波、透射横波、透射纵波和透射横波的波矢; \mathbf{U} 代表平面波的位移矢量; U 代表振幅; “ $\hat{\cdot}$ ”表示该物理量为单位矢量; $K_{\text{Q}} = \omega/c_{\text{Q}}$ ($\text{Q} = \text{Lr}, \text{Ld}, \text{Tr}, \text{Td}$)为波数。

根据平面应变假设, 应力表达式:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial a_j} + \frac{\partial U_j}{\partial a_i} \right) + \lambda \frac{\partial U_l}{\partial a_l} \delta_{ij}, \quad (6)$$

其中, $i, j = y, z$ 。

将式(4)、式(6)代入式(1)中, 可得四阶齐次线性方程组:

$$\mathbf{A} = \mathbf{BC}, \quad (7)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -j(\lambda + 2\mu)K_{\text{Lr}}\cos 2\theta_{\text{Tr}} - K_{\text{N}}\cos \theta_{\text{Lr}} \\ -K_{\text{N}}\cos \theta_{\text{Lr}} \\ j\mu K_{\text{Lr}}\sin 2\theta_{\text{Lr}} + K_{\text{T}}\sin \theta_{\text{Lr}} \\ K_{\text{T}}\sin \theta_{\text{Lr}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B1} \ \mathbf{B2} \ \mathbf{B3} \ \mathbf{B4}],$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} U_{\text{Lr}} & U_{\text{Ld}} & U_{\text{Tr}} & U_{\text{Td}} \\ U_{\text{IL}} & U_{\text{IL}} & U_{\text{IL}} & U_{\text{IL}} \end{bmatrix}^{\text{T}},$$

$$\mathbf{B1} = \begin{bmatrix} j(\lambda + 2\mu)K_{\text{Lr}}\cos 2\theta_{\text{Tr}} - K_{\text{N}}\cos \theta_{\text{Lr}} \\ -K_{\text{N}}\cos \theta_{\text{Lr}} \\ j\mu K_{\text{Lr}}\sin 2\theta_{\text{Lr}} - K_{\text{T}}\sin \theta_{\text{Lr}} \\ -K_{\text{T}}\sin \theta_{\text{Lr}} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B2} &= \begin{bmatrix} -K_{\text{N}}\cos \theta_{\text{Ld}} \\ j(\lambda' + 2\mu')K_{\text{Ld}}\cos 2\theta_{\text{Td}} - K_{\text{N}}\cos \theta_{\text{Ld}} \\ K_{\text{T}}\sin \theta_{\text{Ld}} \\ -j\mu'K_{\text{Ld}}\sin 2\theta_{\text{Ld}} + K_{\text{T}}\sin \theta_{\text{Ld}} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B3} &= \begin{bmatrix} j\mu K_{\text{Tr}}\sin 2\theta_{\text{Tr}} + K_{\text{N}}\sin \theta_{\text{Tr}} \\ K_{\text{N}}\sin \theta_{\text{Tr}} \\ j\mu K_{\text{Tr}}\cos 2\theta_{\text{Tr}} - K_{\text{T}}\cos \theta_{\text{Tr}} \\ -K_{\text{T}}\cos \theta_{\text{Tr}} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B4} &= \begin{bmatrix} K_{\text{N}}\sin \theta_{\text{Td}} \\ -j\mu'K_{\text{Td}}\sin 2\theta_{\text{Td}} + K_{\text{N}}\sin \theta_{\text{Td}} \\ K_{\text{T}}\cos \theta_{\text{Td}} \\ -j\mu'K_{\text{Td}}\cos 2\theta_{\text{Td}} + K_{\text{T}}\cos \theta_{\text{Td}} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

将入射波和透射波振幅归一化, $R_{\text{Lr}} = U_{\text{Lr}}/U_{\text{IL}}$ 为纵波反射系数, $R_{\text{Tr}} = U_{\text{Tr}}/U_{\text{IL}}$ 为横波反射系数, $R_{\text{Ld}} = U_{\text{Ld}}/U_{\text{IL}}$ 为纵波透射系数, $R_{\text{Td}} = U_{\text{Td}}/U_{\text{IL}}$ 为横波透射系数。该系数为无限宽声束情况下计算所得, 但实际测量中, 超声换能器的区域为有限区域, 即声束宽度是有限的。因此, 发展基于有限宽超声束的固体间界面特性评价是必要的。

1.2 有限宽超声束在界面的声反射

有限宽超声束可视为一系列连续变化的平面波组成。如图2所示, 波矢在 Ox 轴的投影为 ξ 的一系列平面波可根据反射情况划分为两个区域, Oy' 至 Oy'' 区域内的平面波有反射作用, 而对 Oy''' 至 Ox 区域内的平面波没有反射作用。经固-固界面反射后反射声束的声场为^[13]

$$\begin{aligned} u(x, z) &= \int_{-(\pi/2-\theta)}^{\pi/2} R(\alpha)F(\alpha, \theta, a, x, z)d\alpha \\ &+ \int_{\pi/2}^{\theta+\pi/2} R(\alpha)F(\alpha, \theta, a, x, z)d\alpha, \end{aligned} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} F(\alpha, \theta, a, x, z) &= \frac{\sin[2\pi \sin(\alpha - \theta)a/\lambda]}{\pi \sin(\alpha - \theta)} \cos(\alpha - \theta) \\ &\times \exp[j2\pi \sin(\alpha - \theta)x/\lambda \\ &+ j2\pi \cos(\alpha - \theta)z/\lambda]. \end{aligned} \quad (9)$$

考虑实际超声测量过程, 本文通过定义有限宽超声束的镜面反射系数来表征界面的退化状态。如

图2所示,入射有限宽纵波声束 AA' 与反射纵波束截面 BB' 呈镜面对称,将纵波镜面反射系数定义为反射纵波束在 $\overline{BB'}$ 上的平均法向位移与入射纵波束在 $\overline{AA'}$ 上的平均法向位移之比。当反射纵波传播至 BB' 截面时,反射横波同时传播至 CC' 截面,即 $OO' = O'O''$, $O'O''/c_L = O'O'''/c_T$ 。因此横波镜面反射系数可定义为反射横波束在 $\overline{CC'}$ 上的平均切向位移与入射纵波束在 $\overline{AA'}$ 上的平均法向位移之比。

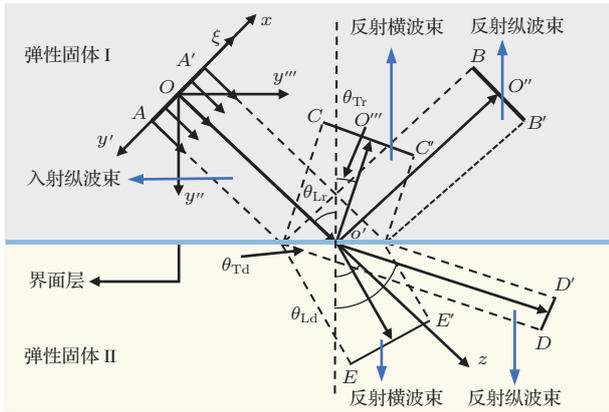


图2 有限宽超声纵波束在界面的声反射示意图

Fig. 2 Schematic of acoustic reflection of a bounded ultrasonic longitudinal wave beam at the interface

2 数值计算

此节以有机玻璃-铝界面为例,通过界面弹簧模型对界面的退化状态进行分析。如图2所示,设超声纵波束的频率为 $f = 1$ MHz,从半无限大有机

玻璃斜入射至有机玻璃-铝界面处时,会发生透射和反射。超声纵波束宽度设置为 $AA' = 10\lambda_L$,其中入射纵波波长 $\lambda_L = 2.66$ mm。同时假设界面薄层为环氧树脂等效薄层。利用法向界面劲度系数表示界面的退化状态,同时保持 $K_T/K_N = 6/31$ 为定值^[14],即当切向界面劲度系数变化时,法向界面劲度系数亦发生改变,以保证两者比值不变。在本文中,当 $K_N = 10^{16}$ N/m³时,界面视为理想界面;当 $K_N < 10^{12}$ N/m³时,界面视为已完全破坏^[15]。当法向界面劲度系数在位于 $[10^{12}, 10^{16}]$ N/m³范围内时,界面处于退化状态。层状复合材料的两固体材料参数如表1所示。有限宽超声束的传播距离: $OO' = O'O'' = 25\lambda_L$, $O'O''' = 25\lambda_T$ 。纵波线接收宽度 $BB' = 10\lambda_L$ 。横波线接收宽度 $CC' = 10\lambda_T$ 。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	纵波声速/ (m·s ⁻¹)	横波声速/ (m·s ⁻¹)
有机玻璃	1140	2660	1250
铝	2710	6198	3122

根据式(7)和式(8),通过计算可分别得出随界面退化状态改变的纵波和横波镜面反射系数。图3(a)和图3(b)分别示出了纵波和横波镜面反射系数随界面劲度系数和入射角度之间的变化关系,图中颜色条的颜色值表示反射镜面系数的大小。从图3(a)中可以看出,当超声纵波入射角在范围 $[30^\circ, 60^\circ]$ 时,镜面纵波反射系数随界面退化的变化较为剧烈,

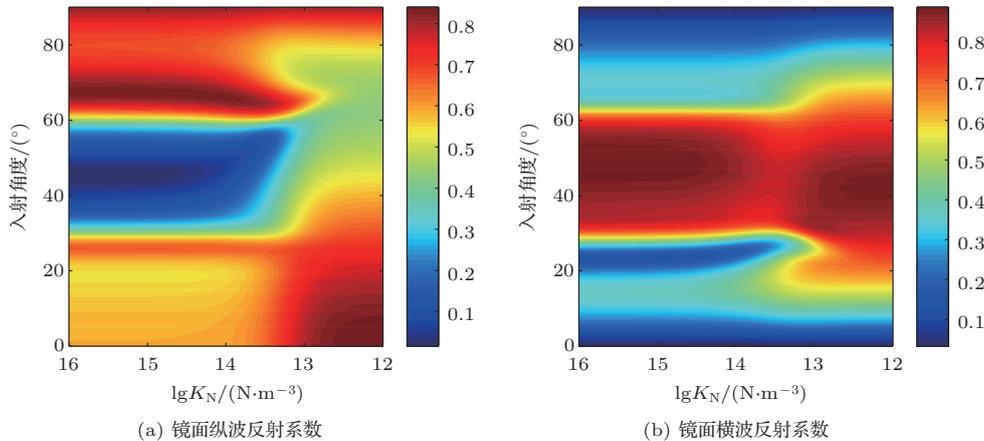


图3 有限宽超声纵波束斜入射界面时镜面反射系数与界面劲度系数、入射角的关系

Fig. 3 The relationship between the interfacial stiffness coefficient, incident angle and the specular reflection coefficient of a bounded ultrasonic longitudinal wave beam by oblique incidence transmitted to the interface

从几乎不反射纵波到出现明显的反射纵波。从图 3(b) 中可以看出, 镜面横波反射系数在范围 $[30^\circ, 60^\circ]$ 内的变化较小。对比可知, 纵波反射系数对界面退化状态更敏感。据此可在此范围内选择适当的入射角, 根据镜面纵波反射系数的变化对界面退化状态进行评价。

根据图 3 的计算结果, 本文选择 44.8° 的纵波入射角作为入射条件对界面退化状态进行评价。图 4 给出了纵波和横波镜面反射系数随 K_N 的变化曲线, 其中实线表示 44.8° 条件下镜面纵波反射系数, 虚线表示 44.8° 条件下镜面横波反射系数。从图 4 中可明显得出, 当界面劲度系数 K_N 趋于 10^{16} N/m^3 时, 镜面纵波反射系数几乎为 0, 可认为此时界面处于完好状态。随着界面退化的出现, 开始出现明显的反射纵波, 且对应的镜面反射系数随着界面退化程度的加剧而变大, 直至界面发生破坏。同时从图 4 中可见, 镜面纵波反射系数随界面劲度系数的变化曲线具有单调性, 而镜面横波反射系数随界面劲度系数 K_N 的变化不敏感。因此, 当选择恰当的纵波入射角时, 纵波镜面反射系数更利于表征界面退化特性。

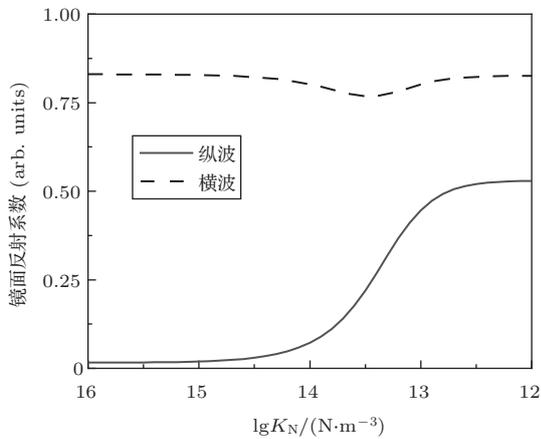


图 4 入射角为 44.8° 时镜面反射系数随法向界面劲度系数的变化曲线

Fig. 4 Curves of the specular reflection coefficient with interfacial normal stiffness coefficient when the incident angle equals 44.8°

3 仿真分析

本文的仿真模拟基于有限元商业软件, 以有机玻璃-铝粘接结构为研究对象, 建立超声纵波束在有机玻璃-铝粘接结构中传播的二维有限元模型, 仿真

研究有限宽超声纵波束在给定角度下, 界面退化特性对镜面反射系数的影响。研究结果可为固-固界面退化特性的超声反射评价方法提供重要依据。

3.1 模型建立

仿真几何模型为二维模型, 图 5 为有限宽超声纵波束斜入射有机玻璃-铝层状复合材料时的二维示意图。模型 z 方向的长度为 100 mm , 从上到下的材料依次为有机玻璃、界面层和铝, 其厚度分别为 70 mm 、 0.01 mm 、 50 mm 。有机玻璃和铝的材料参数见表 1。

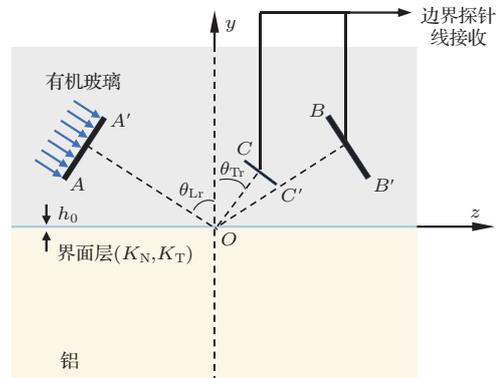


图 5 用于仿真的二维示意图

Fig. 5 The 2D schematic for simulation

所设定的界面薄层厚度 $h_0 = 0.01 \text{ mm}$, 其厚度远小于有机玻璃的纵波波长 $\lambda_L = 2.66 \text{ mm}$, 满足界面层厚度远小于波长的等效条件。同时界面薄层的等效泊松比和密度参照常用的胶接材料环氧树脂材料进行设定: 泊松比 $\nu_0 = 0.38$, 密度 $\rho_0 = 1120 \text{ kg/m}^3$ 。界面薄层的退化特性可用 K_N 、 K_T 来表征, 当泊松比和密度一定时, 可以通过调整单一的物理量 K_N 达到改变界面状态的要求, 实现界面退化的仿真^[16]。由图 4 可知, 当界面处于退化阶段时, 镜面纵波反射系数变化明显, 所以选取了如表 2 所示的 13 种界面状态进行仿真研究。

为激发有限宽超声纵波束, 如图 5 所示在有机玻璃的内部左侧设置一条宽度为 $10\lambda_L$ 的线源, 该激励源的中点与坐标原点的距离为 $25\lambda_L$, 在该线源施加指定的位移条件。因为激发的是纵波, 所以位移边界条件仅需在边界的法向进行设置, 且在线源上均匀分布。位移条件是一束汉宁窗调制的正弦脉冲信号, 其时域波形和频谱如图 6 所示。该信号的载波频率为 $f = 1 \text{ MHz}$, 周波数 $N = 10$, 幅值

$A = 1 \times 10^{-4}$ mm。产生的有限宽超声纵波束的入射角 $\theta_{Lr} = 44.8^\circ$ 。为了消除边界反射回波对结果的干扰,在模型的边界上加上吸收边界条件。

表2 13种不同界面状态下的 K_N 值

Table 2 Magnitudes of K_N for twelve different interface statuses

界面状态	$K_N/(N \cdot m^{-3})$	界面状态	$K_N/(N \cdot m^{-3})$
IS 0	10^{16}	IS 7	0.8×10^{14}
IS 1	10^{15}	IS 8	0.6×10^{14}
IS 2	0.8×10^{15}	IS 9	0.6×10^{14}
IS 3	0.6×10^{15}	IS 10	0.2×10^{14}
IS 4	0.4×10^{15}	IS 11	10^{13}
IS 5	0.2×10^{15}	IS 12	10^{12}
IS 6	10^{14}		

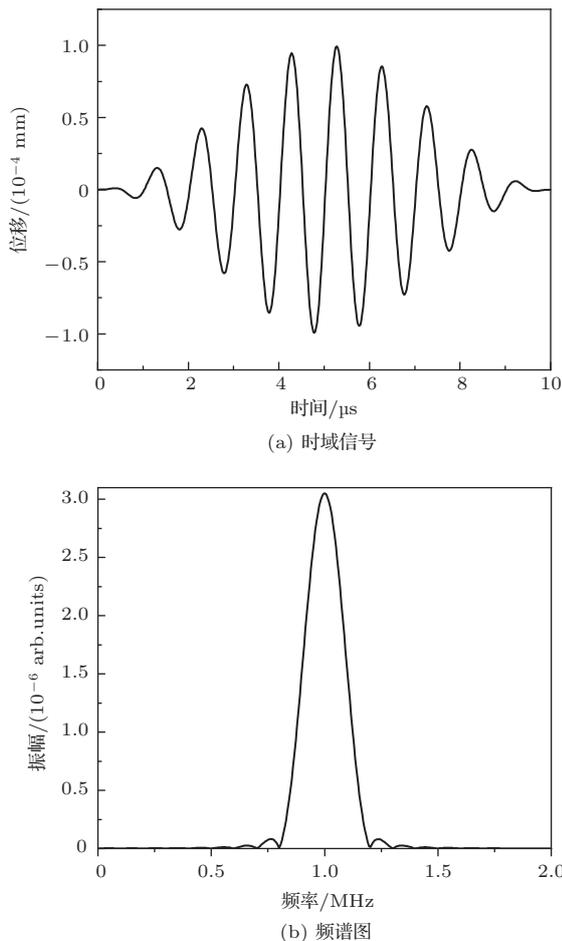


图6 激励源时域信号与频谱图

Fig. 6 The time domain signal and spectrogram of the excitation source

为满足仿真的精确性,采用映射划分空间网格,设置单元的最大尺寸为0.3 mm,时间增量步为 2×10^{-8} s,使用商业有限元软件的固体力学模块进行瞬态分析。考虑实际情况中接收超声信号的探头并不是一个点,而是有限宽度的区域,如图5所示,探针1设置为右侧与线源关于模型中线镜面对称的线 BB' ,以及探针2设置为线 CC' 。探针设置为边界探针的位移平均值,用于接收线 BB' 的平均法向位移分量的时域信号以及线 CC' 的平均切向位移分量的时域信号。取探针1所接收的平均时域信号中的反射纵波成分进行快速傅里叶变换后,取频谱中1 MHz处的振幅与激励信号频谱中1 MHz处的振幅之比作为镜面纵波反射系数。当反射纵波传播至探针1处时,反射横波同时传播至探针2处,因此为了便于计算与理解,在计算镜面横波反射系数时以探针2处所得信号进行计算,对应的计算方法与镜面纵波反射系数时相同。

3.2 结果与讨论

探针1在 BB' 处接收不同界面状态下的平均反射纵波法向位移如图7所示。由图7可知当界面接近完好时即 $K_N = 10^{16}$ N/m^3 ,其位移幅值相较于入射纵波可近似认为为0。当界面退化即 K_N 值减小,探针接收的位移幅值开始逐渐与入射纵波的位移幅值处于同一量级。同时对探针1和探针2接收的原始信号进行快速傅里叶变换,取变换后 $f = 1$ MHz处对应的振幅值与入射超声束 $f = 1$ MHz处对应的振幅值之比作为镜面反射系数,以分析有限宽超声纵波束斜入射对界面退化特性的变化规律。为了验证仿真计算是否与数值计算吻合,图8绘制了数值计算以及仿真计算随界面状态变化的关系曲线。由图8可知,当有限宽超声纵波束入射角为 44.8° 时,在界面退化早期,镜面纵波反射系数变化程度随界面退化的程度而加剧。当界面接近破坏时,该系数的变化幅度开始逐渐减少。而此时的镜面横波反射系数随界面退化呈先减小后变大的趋势,但镜面横波反射系数随界面退化的变化率远远小于镜面纵波反射系数。由于界面弹簧模型是一个等效模型,并不能完全精确地描述界面特性,所以数值计算结果与仿真结果存在一定差异性,但并不影响镜面反射系数随界面退化改变的变换规律。可认为数值计算与仿真计算具有较好的吻

合性,且再次验证了镜面纵波反射系数随界面退化而发生单调且敏感的变化。

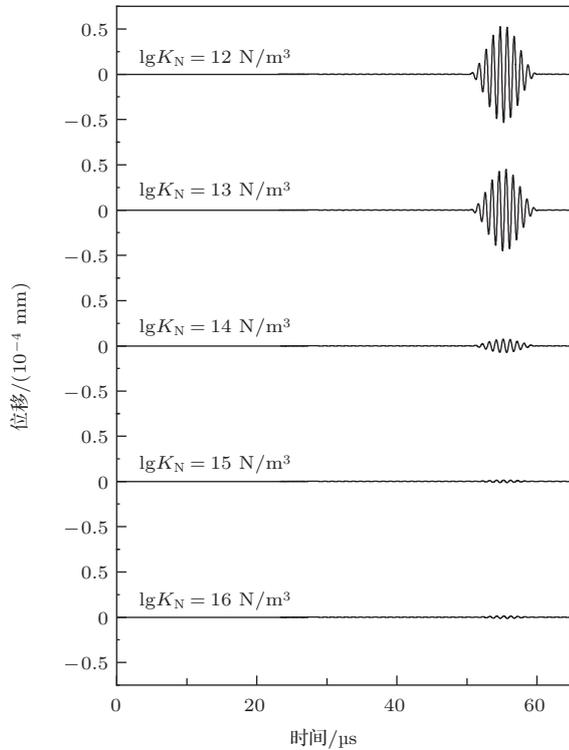


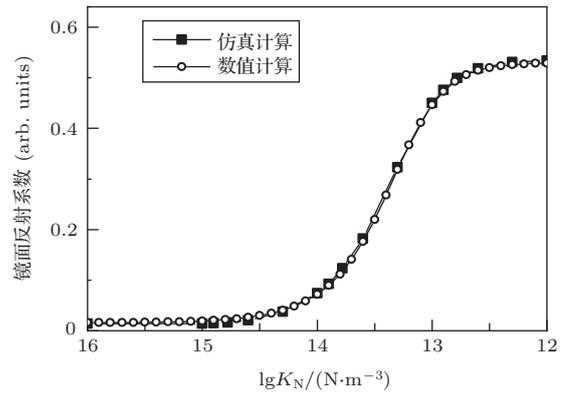
图7 反射纵波在 $\overline{BB'}$ 处的时域信号

Fig. 7 The time domain signal of the reflected longitudinal wave at $\overline{BB'}$

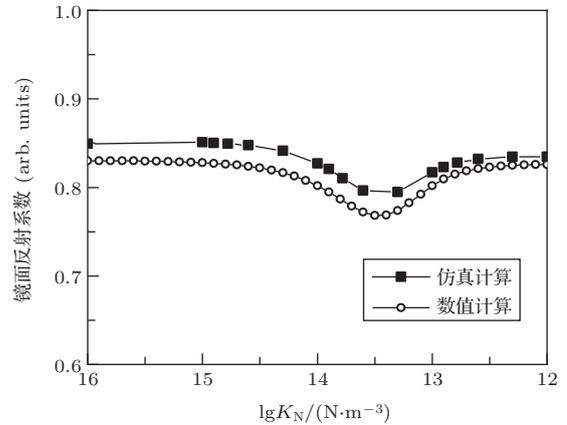
考虑到入射超声纵波束的宽度对镜面反射系数有一定的影响,进一步仿真了入射纵波束宽度为 $5\lambda_L$ 的情况。将模型的激励源和探针1的宽度均改为 $5\lambda_L$ 。图9绘制了激励源为 $5\lambda_L$ 情况下数值计算和仿真计算的镜面纵波反射系数随界面退化的关系曲线。对比图9和图8(a)可知,超声纵波束的宽度会影响镜面纵波反射系数的数值大小,但是并未改变镜面纵波反射系数随界面退化而发生单调且敏感变化的趋势。

4 结论

本文基于界面弹簧模型以及有限宽超声束的反射理论,对有限宽超声纵波以不同入射角在不同界面退化程度的固-固界面中的反射特性进行了相应的数值计算和仿真研究。同时针对实际实验测量中超声换能器探头激发和接收的信号是有限区域的平均信号,定义了镜面反射系数。通过数值计算发现,有限宽纵波束以不同入射角斜入射至固-固



(a) 反射纵波



(b) 反射横波

图8 激励宽度为 $10\lambda_L$ 时,镜面反射系数随界面退化的关系曲线

Fig. 8 Cures of the specular reflection coefficient with the change of the interface state when the width of the excitation source is $10\lambda_L$

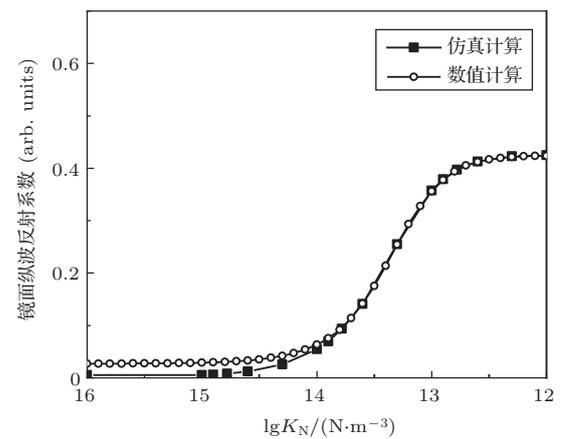


图9 激励宽度为 $5\lambda_L$ 时,镜面纵波反射系数随界面退化的关系曲线

Fig. 9 Cures of the specular reflection coefficient of the longitudinal wave with the change of the interfacial state when the width of the excitation source is $5\lambda_L$

界面时,产生的反射波随界面退化程度的变化趋势并不相同,且在某些特定的角度时,镜面反射系数随界面退化发生单调且敏感的变化,同时通过有限元仿真验证了数值计算。通过绘制镜面反射系数随界面退化的关系曲线,发现了在某些角度下,在界面退化发生前,镜面反射系数不随劲度系数的增加而改变,而在界面退化发生后至完全破坏前,镜面反射系数随界面退化程度出现显著变化,当界面破坏后,镜面反射系数不再随劲度系数改变,证明了通过镜面反射系数定征评价界面退化程度的可行性。此外,研究还表明了超声束的宽度会影响镜面反射系数的大小,但不会改变其随界面退化的变化趋势。该项工作可为超声对固-固界面退化特性的超声无损检测和评价提供一定的理论依据。

参 考 文 献

- [1] 张婷, 许浩, 李仲杰, 等. 层状金属复合材料的发展历程及现状 [J]. 工程科学学报, 2021, 43(1): 67-75.
Zhang Ting, Xu Hao, Li Zhongjie, et al. Development and present situation of laminated metal composites[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(1): 67-75.
- [2] 沈观林, 胡更开, 刘彬. 复合材料力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [3] 孙丽莉, 贾玉玺, 孙胜, 等. 界面强度对纤维复合材料破坏及力学性能的影响 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2009, 39(2): 101-103.
Sun Lili, Jia Yuxi, Sun Sheng, et al. Influence of interfacial strength on fracture process and mechanical properties of fiber composites[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2009, 39(2): 101-103.
- [4] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.
Zhang Hui, Song Yanan, Wang Yaonan, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11-25.
- [5] 刘松平, 刘菲菲, 李乐刚, 等. 航空复合材料无损检测与评估技术研究进展回顾 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 14-27.
Liu Songping, Liu Feifei, Li Legang, et al. Review of research progress on nondestructive testing and evaluation techniques for aero-composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 14-27.
- [6] 孟宪伟, 程号, 刘世铎. 超声检测的应用及发展 [J]. 西部皮革, 2020, 42(9): 43-59.
- [7] 吴斌, 张婧, 邱兆国, 等. 浸水斜入射条件下黏接结构的透射特性研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 45-52.
Wu Bin, Zhang Jing, Qiu Zhaoguo, et al. Research on the transmission characteristics of underwater bonding structure in oblique incidence[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 45-52.
- [8] 艾春安, 刘瑜, 徐志高, 等. “三明治”结构强度弱化的反射特性研究 [J]. 应用力学学报, 2013, 30(2): 179-183, 300.
- [9] 孙凯华, 李建文, 孙朝明, 等. 钢-铅粘接结构的粘接强度对超声体波反射与透射特性的影响 [J]. 应用声学, 2019, 38(1): 93-104.
Sun Kaihua, Li Jianwen, Sun Chaoming, et al. Influences of bonding strength on reflection and transmission characteristics of ultrasonic bulk waves in steel-lead bonded structure[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(1): 93-104.
- [10] Rokhlin S I, Wang Y J. Analysis of boundary conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 89(2): 503-515.
- [11] 王耀俊. 固体间界面的物理模型和界面对声波的反射 [J]. 物理, 2002, 31(12): 768-772.
Wang Yaojun. A physical model of the interface between two solids and the acoustic reflection therein[J]. Physics, 2002, 31(12): 768-772.
- [12] J.L. 罗斯. 固体中的超声波 [M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 北京: 科学出版社, 2019.
- [13] 邓明晰. 有限入射声束在液固界面声反射的数值研究 [J]. 应用声学, 1998, 17(4): 11-17.
Deng Mingxi. Numerical study of the reflection of a bounded acoustic beam at the interface between liquid and solid[J]. Journal of Applied Acoustics, 1998, 17(4): 11-17.
- [14] 陈瀚, 邓明晰, 高广健, 等. 界面特性对兰姆波混频效应的影响 [J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 2019, 47(6): 1-7.
Chen Han, Deng Mingxi, Gao Guangjian, et al. Influence of interfacial properties on the frequency mixing response of Lamb wave propagation[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 1-7.
- [15] 邓明晰. 弱界面分层结构中的非线性兰姆波 [J]. 声学学报, 2007, 32(3): 205-211.
Deng Mingxi. Nonlinear Lamb wave propagation in layered planar structures with weak interfaces[J]. Acta Acustica, 2007, 32(3): 205-211.
- [16] Chen H, Deng M, Hu N, et al. Analysis of second-harmonic generation of low-frequency dilatational Lamb waves in a two-layered composite plate[J]. Chinese Physics Letters, 2018, 35(11): 50-54.